Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 6843F

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice — N.M. Robert LeMeur

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
Canadian Marine Drilling Ltd.

AOÛT 1985

CA1
DTC 849
85
M23ISZ
c.2

Canada

88-00280/

Library and Information Centre / Centre de documentation (OSLA)
RECEIVED - REÇU LE
JUL 17 1987
Transport Canada / Transports Canada

TP 6843F

MESURE DES PARAMÈTRES D'INTERACTION GLACES/HÉLICE - N.M. ROBERT LEMEUR

par

J. Duff
K. Kirby
V. Laskow

Canadian Marine Drilling Ltd.

Août 1985

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters - M.V. Robert Lemeur", TP 6843E.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche était composée des personnes suivantes:

H. Bergen
S. Cornett
B. Cowper (ARCTEC CANADA LTD.)
J. Duff
M. Edgecombe
K. Kirby (GENERIC CONSULTANTS)
V. Laskow (ARCTIC RESEARCH AND DEVELOPMENT)
D. Montgomery
J. Shaw
P. Spencer

Le comité de direction était composé de:

A. C. Churcher
B. M. Johansson
A. J. Keinonen
J. L. Strand

Transports Canada / Transport Canada

Développement / Development

FORMULE DOCUMENTAIRE DU RAPPORT

1. Nº du rapport Transports Canada	2. Nº de l'étude — CDT	3. Nº de catalogue du destinataire
TP 6843F	6176/6177/6178	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice - N.M. Robert LeMeur	Août 1985
	6. Nº du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. Nº de dossier Transports Canada
J. Duff, K. Kirby, V. Laskow	D 1460-156-6

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. Nº de dossier — ASC
Canadian Marine Drilling Limited P.O. Box 200 Calgary, Alberta T2P 2H8	10SD T8200-3-3599
	11. Nº de contrat — ASC ou Transports Canada 0SD84-00236

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy-Favreau, 200 o., boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal, Québec H2Z 1X4	Sommaire
	14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
Sommaire de "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters - M.V. Robert LeMeur", TP 6839E, TP 6840E et TP 6842E.	I.M. Bayly

17. Résumé

Ce rapport rend compte des résultats de l'analyse préliminaire des données recueillies à bord du Robert LeMeur au cours de la saison d'exploitation 1984, y compris les cinq journées consacrées aux essais spécialisés en juin de cette année. L'analyse a porté sur les organes de la chaîne cinématique et, notamment, sur les chocs subis par les pales d'hélice et leurs répercussions sur la ligne d'arbres. Un modèle de l'interaction glaces/pales est proposé, fondé sur l'analyse des données, ainsi qu'un modèle figurant la tenue de l'arbre et de la goupille d'accouplement au couple de torsion et à la poussée résultant de cette interaction. Les logiciels utilisés sont décrits en détail. Sont enfin présentées des conclusions intéressant la réglementation actuelle et celle à venir.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Navire, hélice, glaces, propulsion, pales, chocs, interaction.	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	48	-

Transport Canada / Transports Canada

Development / Développement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 6843F	6176/6177/6178	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice - N.M. Robert LeMeur	August 1985
	6. Performing Organization Report No.
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
J. Duff, K. Kirby, V. Laskow	D 1460-156-6
9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Canadian Marine Drilling Limited P.O. Box 200 Calgary, Alberta T2P 2H8	10SD T8200-3-3599
	11. DSS or Transport Canada Contract No.
	0SD84-00236
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary
	14 Sponsoring Agency Code
15 Supplementary Notes Summary of "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters - M.V. Robert LeMeur", TP 6839E, TP 6840E and TP 6842E.	16. TDC Project Officer I.M. Bayly

17 Abstract

This report documents the preliminary analysis of the data collected on board the M.V. Robert LeMeur during the 1984 operating season, including five days of dedicated tests in June 1984. Analysis of the propulsion train components is performed. Propeller ice impact forces are analyzed and the response of the shafting system is determined. A model of blade-ice interaction is proposed based on the data analysis. A model of the yoke-pin and shaft response to the ice torque and thrust is also developed. Software used during data analysis is fully documented. Conclusions pertinent to regulatory purposes are derived.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Ship, propellers, ice, propulsion, blade, impact, interaction.	A limited number of copies are available from Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	48	-

TDC CDT 79-005
Rev 86

Canada

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner l'appui et la contribution de M. I.M. Bayly sans lequel ce projet n'aurait pu être mené à terme.

Ils tiennent également à remercier les officiers et membres d'équipage du N.M. Robert LeMeur pour leur aide de même que pour la patience et l'esprit de coopération dont ils ont fait preuve.

AVANT-PROPOS

Ce document résume le dernier d'une série de comptes rendus concernant la mesure des paramètres d'interaction glaces/pales d'hélice à bord du Robert LeMeur. Le premier compte rendu de la série qui s'intitule "The MV Robert LeMeur Nozzle Propeller Ice Force Measurement Project - 1983 Final Report" TP 5685E, avait été soumis au Centre de développement de transports par la société Canmar. Le programme d'expérimentations visé par ce rapport n'avait pas donné les résultats escomptés, en raison des nombreuses défaillances des jauges de contrainte mises en place pour mesurer les efforts subis par l'hélice. Le programme dont il est question ici visait à combler les lacunes constatées par l'acquisition de données plus détaillées et une modélisation analytique de l'interaction glaces/pales d'hélice.

Ce programme a fait l'objet de deux rapports. Le premier, intitulé: "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters Engineering and Field Tests", TP 6842E, a été préparé pour le compte du CDT par la société Canmar. Le deuxième, qui est le rapport final résumé dans ces pages, s'intitule: "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters - MV Robert LeMeur" Centre de développement des transports, Transports Canada, TP 6839E, 6840E et 6842E.

TABLE DES MATIÈRES

1. APERÇU 1

2. OBJECTIFS 2

3. DONNÉES DE BASE 5
   3.1 Caractéristiques du navire 5
   3.2 Distribution dimensionnelle des blocs de glace 5

4. ANALYSE DES DONNÉES 11
   4.1 Logiciel 11
   4.2 Classement des événements 14
   4.3 Description d'un événement 14
   4.4 Analyse des efforts sur pale 14
   4.5 Couple de torsion sur arbre 20
   4.6 Poussée sur arbre 20
   4.7 Modèle théorique 25
   4.8 Modélisation des efforts de torsion et de poussée 26
   4.9 Modèle théorique de la goupille d'accouplement 27
   4.10 Sondes de proximité 27

5. ANALYSE STATISTIQUE À LONG TERME 32

6. RECOMMANDATIONS 35
   6.1 Généralités 35
   6.2 Pale 35
   6.3 Paliers 35
   6.4 Ligne d'arbres 36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Paramètres de base du N.M. Robert LeMeur 6

Tableau 4.1.1 Voies du programme "ANALYZE 4-1" 12
Tableau 4.1.2 Voies de traitement par "STATALYZE 8" 13

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Plan d'ensemble du N.M. Robert LeMeur	8
Figure 3.2	Emplacement des capteurs sur la ligne d'arbres de tribord	9
Figure 3.3	Distribution de probabilité de dépassement de la taille des blocs de glace	10
Figure 4.4.1	Histogramme des forces maxi subies par la pale instrumentée	15
Figure 4.4.2	Évolution dans le temps de la force exercée sur la pale instrumentée - événement 72	16
Figure 4.4.3	Relation entre la valeur maximum des forces enregistrées et le genre d'interaction	17
Figure 4.4.4	Relation entre la vitesse de rotation de l'arbre et la valeur maximum des forces enregistrées par la pale instrumentée, angle de pas positif	19
Figure 4.5.1	Histogramme des couples de torsion maximums subis par l'arbre instrumenté	21
Figure 4.5.2	Histogramme des poussées maximums subies par l'arbre instrumenté	22
Figure 4.5.3	Histogramme des poussées minimums subies par l'arbre instrumenté	23
Figure 4.8.1	Variation estimative du couple de torsion sur pale - événement 117	28
Figure 4.8.2	Variation calculée des poussées correspondant à une série d'impacts de faible durée - événement 72	29
Figure 4.9.1	Histogramme des forces maximums sur le coulisseau d'orientation des pales	30
Figure 4.10.1	Figures de Lissajous relatives aux événements 8 à 12	31
Figure 5.1	Nombre des dépassements des valeurs de poussée sur arbre enregistrés au cours de la saison 1984	33
Figure 5.2	Nombre des dépassements des valeurs de torsion sur arbre enregistrés au cours de la saison 1984	34

1. APERÇU

Ce programme d'expérimentations visait à mesurer les efforts subis par l'hélice du Robert LeMeur au contact des glaces. Il a comporté trois phases distinctes:

- Études préparatoires et instrumentation - de décembre 1983 à juin 1984
- Expérimentations - juin-juillet 1984
- Études post-exécution et analyse des données - de juillet 1984 à mars 1985

Les deux premières phases ont fait l'objet d'un rapport désigné Rapport d'étape I et intitulé "Measurement of Ice Interaction Parameters - Engineering and Field Tests", octobre 1984.

Le rapport d'étape 2, produit en décembre 1984 pour satisfaire aux exigences du contrat, a été remplacé par un rapport final intitulé "Measurement of Ice/Propeller Interaction Parameters - M.V. Robert LeMeur" et traitant des études post-exécution et de l'analyse des données.

2. OBJECTIFS

Le projet visait à:

- déterminer, par mesures directes, l'intensité et le point d'application des forces d'interaction glaces/hélice sur une pale d'hélice à pas variable, sous tuyère, et leurs effets au niveau du mécanisme d'orientation logé dans le moyeu et à celui de l'arbre d'hélice;

- enregistrer les mouvements de l'arbre porte-hélice dans le palier de tube d'étambot lorsque l'interaction glaces/hélice est intense;

- enregistrer les essais et leurs résultats en vue de la consultation ultérieure des données et la reprise éventuelle de l'analyse;

- convertir les données en paramètres d'ingénierie et en faire l'analyse pour préciser le phénomène d'interaction glaces/hélice, dans l'optique de la définition de critères de conception et de réglementation.

Le rapport d'étape I décrivait le type d'instrumentation mis en oeuvre à bord du navire Robert LeMeur, précisant les raisons qui avaient présidé à son choix. Il faisait également la description détaillée du programme d'essais prévu et présentait une série de modèles analytiques exploratoires visant à expliquer le lien entre les charges externes subies par divers éléments de la chaîne cinématique et leur comportement.

Le rapport final résumé ici traite des travaux consécutifs à la collecte des données. L'étape en question visait les buts énoncés ci-après:

- ordonner, préserver et protéger les données d'essais en vue de leur usage ultérieur;

- établir des progiciels sous format "accessible", utilisables par d'autres chercheurs;

- épurer les données;

- faire une analyse préliminaire des données;

- extraire de cette analyse les informations pertinentes concernant l'interaction glaces/hélice, la pale d'hélice instrumentée, la goupille d'accouplement, l'arbre d'hélice et le palier de tube d'étambot.

  i. Interaction glaces/hélice: définir, à partir des données d'essais, les types de contacts glaces/hélice, l'intensité des forces en jeu ainsi que les effets hydrodynamiques.

     Comparer la fréquence et l'intensité des interactions glaces/hélice à divers régimes ou modes de fonctionnement du navire. Évaluer les modèles analytiques présentés dans le rapport d'étape I et les modifier au besoin.

  ii. Pale d'hélice: suivre les réactions de la pale instrumentée aux forces exercées par les glaces, recherchant particulièrement les effets d'amplification dynamique des efforts. Évaluer la précision du modèle de pale proposé dans le rapport d'étape I et assimilant celle-ci à une poutre simple.

  iii. Goupille d'accouplement: analyser corrélativement les résultats des étalonnages statiques, des essais en service et ceux de la modélisation concernant la goupille d'accouplement, pour déterminer l'intensité du frottement à la racine de la pale et dans quelle mesure celui-ci intervient dans l'amortissement des chocs communiqués par la pale à cette goupille.

  iv. Arbre porte-hélice: mesurer les variations du couple de torsion et de la poussée axiale subis par l'arbre porte-hélice sous l'effet de l'interaction glaces/hélice, et les comparer aux valeurs fournies par les modèles analytiques présentés dans le premier rapport d'avancement. Évaluer l'opportunité de remplacer les tensiomètres de pale par des tensiomètres d'arbre pour constater le comportement, à long terme, de la chaîne cinématique sous l'effet des charges exercées par les glaces. Mesurer les fluctuations du couple de torsion et de la poussée sur l'arbre au cours d'une saison d'exploitation complète, et déterminer leur portée statistique.

v. Palier de tube d'étambot: constater les mouvements de l'arbre porte-hélice dans le palier de tube d'étambot, et expliquer leurs répercussions sur la conception de ce palier.

vi. Statistiques à long terme concernant l'arbre porte-hélice: déterminer dans quelle mesure les 343 enregistrements sont représentatifs d'une saison complète d'exploitation. Déterminer les couples de torsion et efforts axiaux susceptibles d'être subis par l'arbre au cours d'une saison complète d'exploitation, en vue d'une utilisation éventuelle de cette information dans les calculs de fatigue de la chaîne cinématique. Enregistrer un échantillonnage des signaux de mesure des couples de torsion et poussées subis par l'arbre porte-hélice et correspondant aux maximums constatés au cours de la saison d'exploitation.

3. DONNÉES DE BASE

3.1 Caractéristiques du navire

Les principales caractéristiques du N.M. Robert LeMeur figurent au tableau 3.1. Il s'agit d'un brise-glace de ravitaillement de cote arctique 3 selon la classification de la LPPEAN et de cote 100A1 selon celle du LLoyd's Register. Construit par Burrard Yarrows Shipyard de Vancouver pour le compte de Dome Petroleum Ltd. en 1982, il a servi au soutien logistique des navires et plates-formes de forage exploités par Canmar dans la mer de Beaufort.

La propulsion du navire est assurée par deux moteurs développant chacun un maximum d'environ 3530 kW et entraînant une hélice à pas variable par l'intermédiaire d'un réducteur à un seul rapport de démultiplication. Les deux hélices sont entourées d'une tuyère conçue sur commande. Les schémas du navire sont donnés à la figure 3.1 et l'emplacement des transducteurs de mesure de la ligne d'arbres tribord, à la figure 3.2.

3.2 Distribution dimensionnelle des blocs de glace

La distribution dimensionnelle des blocs de glace rencontrés lors des essais de juin/juillet 1984 a été déterminée à partir des photographies prises durant les essais.

La figure 3.3 présente la distribution de la probabilité de dépassement de la taille des blocs de glace observés durant la période d'essais spécialisés de cinq jours.

Tableau 3.1 Paramètres de base du N.M. Robert LeMeur
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Navire:		
Longueur hors tout	82,8 m	
Largeur hors membrures	18,0 m	
Tirant d'eau, configuration brise-glace	5,5 m	
Port en lourd	2690,4 t	
Puissance maximum continue par moteur	3530 kW	
Rapport largeur/diamètre d'hélice	6	
Groupe propulseur		Nombre
Moteur	MAK 12M45EV	2
Embrayage	L&S PNEUMAFLEX KA3200MD	2
Réducteur	L&S GCE8505	2
Hélices		
LIPS	À PAS VARIABLE	
Moyeu	4C115W	
Nombre de pales	4	
Vitesse de rotation	209 tr/min	
Rapport diam. moyeu/diam. hélice	0,367	
Diamètre de l'hélice	3,0 m	
Mécanisme de variation de pas		
Angle normal à r/R 0,7	26,48°	
Angle maximum d'inversion	19,66°	
Angle à l'essai de traction au point fixe	26,12°	
Pales:		
Masse sans pied	452 kg (centre de gravité: 0,947 m)	
Masse avec pied	615 kg (centre de gravité: 0,819 m)	
Matériau	Bronze Cu-Ni-Al	
Charge de rupture	647 MPa	
Limite élastique	260 MPa	
Allongement	20%	
Largeur	1 m	
Épaisseur en bout de pale	,025 m	
Module E de Young	$1,3 \times 10^{11}$ Pa	
Coefficient de Poisson	0,3	
	48 800 MPa	
Charge de rupture	647 MPa	
Limite élastique	260 MPa	

Tuyère:

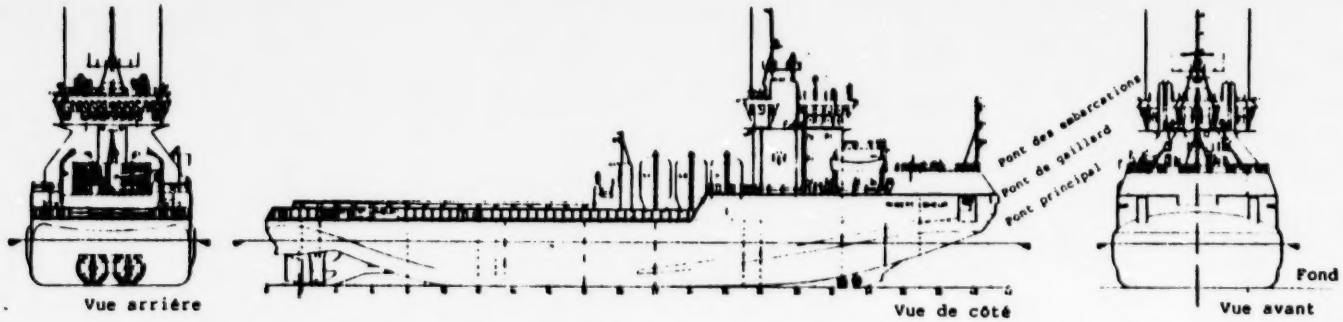
Diamètre intérieur	3,03 m
Longueur (L)	1,4 m
Rapport L/diamètre d'hélice	0,4667

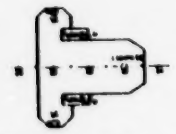
Fréquences propres des éléments du groupe propulseur

Arbre	3,84 Hz
Pales	13,9 Hz
Vibration de flexion des pales (encastrement-libre)	40 Hz dans l'eau (mode fondamental) 90 Hz hors eau (mode fondamental) 120 Hz hors eau (2e mode)
Vibration de torsion des pales	138 Hz hors eau
Vibration longitudinale de l'arbre (hélice, masse ajoutée et volant pris en compte)	25,5 Hz (mode fondamental) 76,1 Hz 2e mode 106,0 Hz 3e mode
Vibration de torsion de l'arbre	3,58 Hz fondamental 13,89 Hz 2e mode 27,12 Hz 3e mode 42,27 Hz 4e mode
Vibration de la coque	2,24 Hz

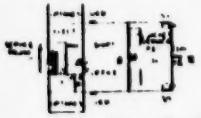
Angle nominal de pas

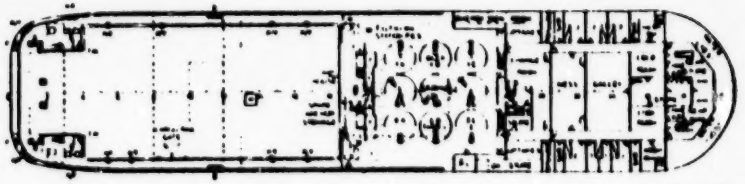
r/R (-)	Angle (en degrés)
0,37	39,5
0,40	37,6
0,5	32,8
0,6	29,3
0,7	26,5
0,8	24,2
0,85	23,3
0,90	22,4
0,95	21,5
1,00	20,8

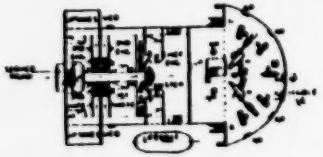


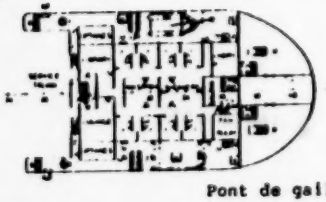

Timonerie-vue en plan

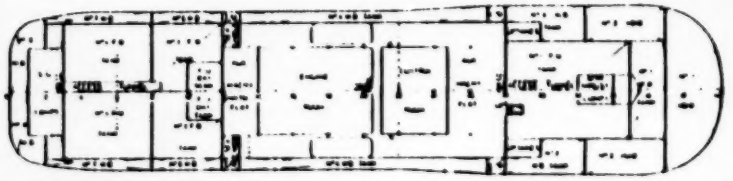
Pont de passerelle de navigation


Pont de passerelle


Pont principal


Pont des embarcations

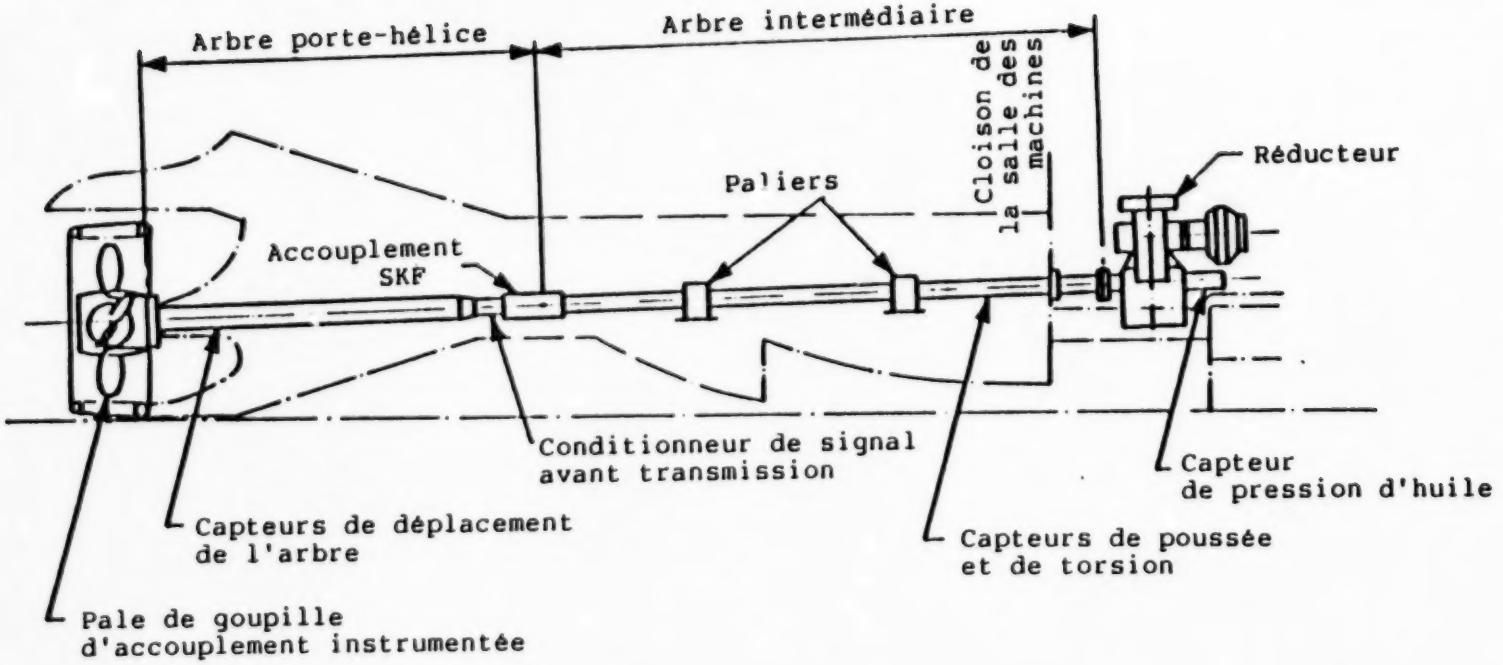

Pont de gaillard


Vue en plan sur pont principal

Caractéristiques principales	
Longueur hors tout	82,800 m
Longueur "entre perpendiculaires"	78,000 m
Longueur ligne d'eau configuration brise-glace	79,125 m
Largeur hors tout	19,034 m
Largeur hors membrures	18,000 m
Creux au pont de gaillard	10,500 m
Creux au pont principal	7,500 m
Tirant d'eau d'été	5,668 m
Tirant d'eau - conf. brise-glace	5,500 m
Maille	2,000 m
Port en lourd (maxi)	2690,4 t
Port d'immatriculation:	Edmonton, Alberta
Jauge nette	1501,49
N° d'immatriculation	801810

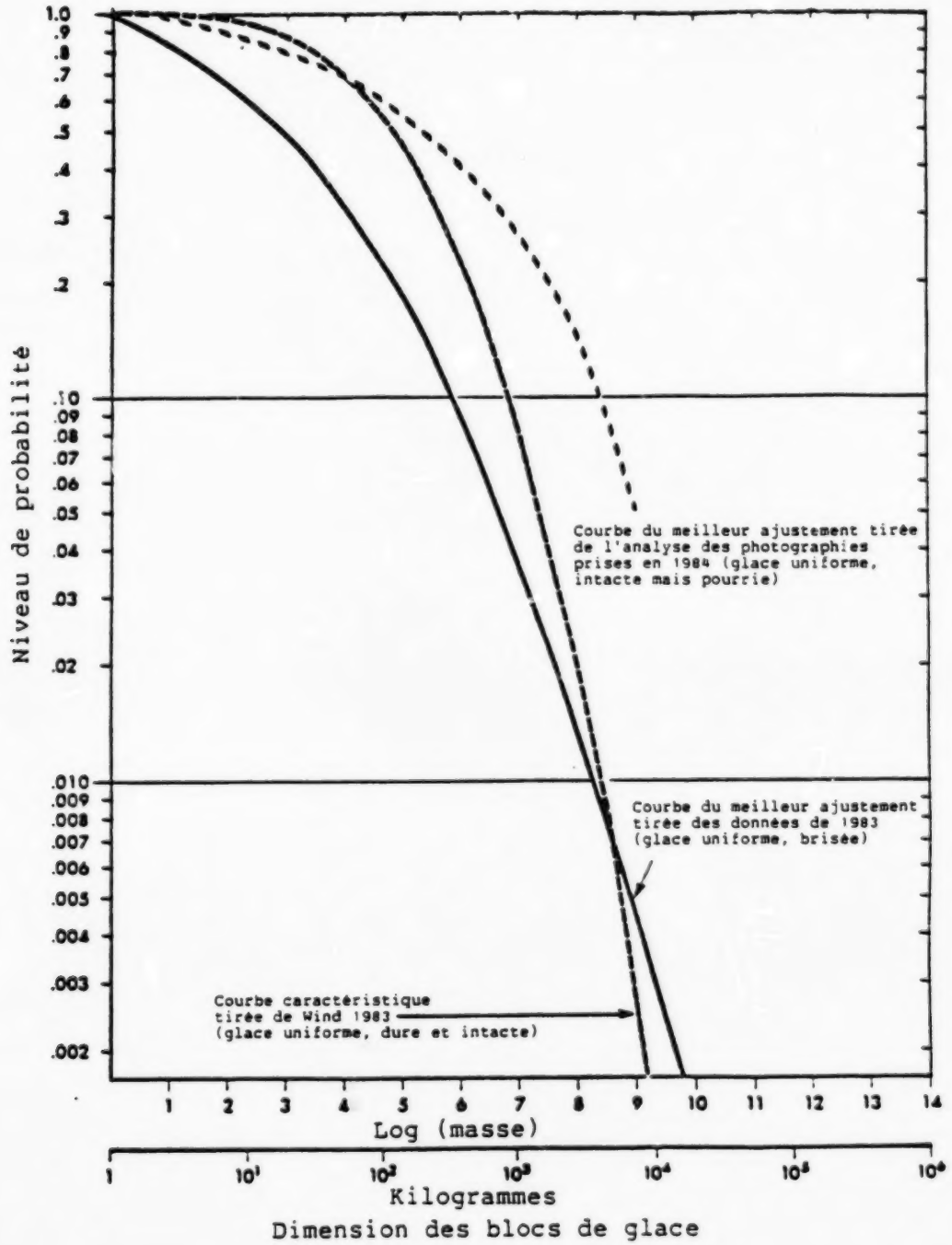
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 3.1 Plan d'ensemble du N.M. Robert LeMeur



Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 3.2 Emplacement des capteurs sur la ligne d'arbres de tribord



Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 3.3 Distribution de la probabilité de dépassement de la taille des blocs de glace

4. ANALYSE DES DONNÉES

4.1 Logiciel

La première tâche suivant la collecte des données a été la formulation d'un logiciel pour le transfert des enregistrements sur disques des 343 événements d'interaction glaces/hélice, sur bandes à neuf pistes compatibles pour le traitement sur machine IBM. Ce travail a donné deux jeux de bandes pour usage ultérieur.

Ensuite, on a formulé deux programmes informatiques pour l'analyse de ces 343 événements. Le premier, appelé "ANALYZE 4-1", sert au traitement des données brutes provenant:

- de 20 étalonnages dynamiques de la pale,
- de 343 disques de données, et
- de 6 bandes neuf pistes contenant des données de contrôle.

Les nouvelles données permettent le calcul des paramètres suivants concernant la pale:

- moment de flexion hors plan de la pale;
- effort hors plan de la pale;
- couple de torsion de la pale; et,
- coordonnées radiales et circonférentielles des points d'application des charges.

Les voies utilisées pour le traitement des données brutes au moyen du programme "ANALYZE 4-1" sont données dans le tableau 4.1.1.

Le second programme d'analyse des données, appelé "STATALYZE 8", sert au traçage des courbes de distribution statistique. Les voies utilisées pour l'analyse statistique des données sont énumérées dans le tableau 4.1.2.

Ensuite, les 343 événements ont été contre-vérifiés pour détecter les cas de capteurs hors d'usage ou mal étalonnés. Les erreurs de transmission et de traitement ont été dépistées et corrigées. À toutes fins pratiques, les données seraient désormais épurées dans une proportion de 90 à 95 p. 100.

Tableau 4.1.1 Voies du programme "ANALYZE 4-1"
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice
Voies utilisées pour le traitement des données brutes

N°	PARAMÈTRES	UNITÉ DE MESURE	OBSERVATIONS
	Valeurs mesurées		
1	Flexion-axe de pale	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
2	Torsion bord de fuite	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
3	Torsion bord d'attaque	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
4	Torsion axe de pale	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
5	Flexion bord de fuite	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
6	Torsion bord d'attaque	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
7	Force sur coulisseau	kN	Signal positif = bord de fuite flexion avant
8	Poussée sur arbre	kN	Signal positif = poussee arrière (traction)
9	Couple de torsion arbre	kN.m	Signal positif = couple moteur
10	Pression d'huile d'asservissement	bar	Variation positive = angle de pas croissant
11	Sonde arrière babord	mm	Variation positive = éloignement
12	Sonde arrière supérieure	mm	Variation positive = éloignement
13	Sonde arrière tribord	mm	Variation positive = éloignement
14	Sonde avant tribord	mm	Variation positive = éloignement
15	Signal rotation arbre	volt	Signal par tout capté à 10 h, vue vers avant
16	Pas d'helice	degré	Signal positif = marche avant
17	Vitesse d'avancement	m/s	Valeur absolue
18	Angle de barre	degré	Signal positif = tribord
	Valeurs calculées		
19	Moment de flexion	kN.m	Signal positif = bout de pale flexion avant
20	Couple de torsion de pale	kN.m	Signal positif = bord de fuite flexion avant
21	Force	kN	Signal positif = bout de pale flexion avant
22	Coordonnées radiales	m	Distance à partir du pied de pale (0,17RR)
23	Coordonnées circonférentielles	m	Distance de l'axe de pale - = Positif = bord d'attaque
24	Moment de flexion (filtré)	kN.m	Signal positif = bout de pale flexion avant
25	Couple de torsion de pale (filtrée)	kN.m	Signal positif = bord de fuite flexion avant
26	Force (filtrée)	kN	Signal positif = bout de pale flexion avant
27	Coordonnees radiales (filtrees)	m	Distance du pied de pale (0,17RR)
28	Coordonnées circonférentielles (filtrees)	m	Distance de l'axe de pale Positif = bord d'attaque
29	Déplacement horizontal arrière	mm	Signal positif = déplacement vers tribord
30	Déplacement vertical arrière	mm	Signal positif = déplacement vers haut
31	Déplacement horizontal avant	mm	Signal positif = déplacement vers tribord
32	Déplacement vertical avant	mm	Signal positif = déplacement vers haut
33	Transformée rapide de Fourier		
34	Vitesse de rotation arbre	tr/min	Toujours positif
35	Filtrage		N'importe quelle voie

Tableau 4.1.2 Voies de traitement par "STATALYZE 8"
Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

N°	PARAMÈTRES	UNITÉ DE MESURE	OBSERVATIONS
1	Flexion axe pale	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
2	Torsion bord de fuite	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
3	Flexion bord d'attaque	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
4	Torsion - jauge axiale	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
5	Flexion bord de fuite	Mpa	Signal positif = bout de pale flexion avant
6	Torsion bord d'attaque	Mpa	Signal positif = bord de fuite flexion avant
7	Force sur coulisseau	kN	Signal positif = bord de fuite flexion avant
8	Poussée sur arbre	kN	Signal positif = poussée arrière (traction)
9	Couple de torsion arbre	kN.m	Signal positif = couple moteur
10	Pression huile d'asservissement	bar	Variation positive = angle de pas croissant
11	Place et direction force maxi	m	0 = pied 0,945 = bout; ,691 = bord d'attaque 0 = axe de pale
12	Sonde arrière supérieure	mm	Variation positive = éloignement
13	Crémaillère d'injection	mm	Variation positive = augmentation de puissance
14	Type d'interaction		0 = aucune; 1 = isolée; 2 = broyage; 3 = engorgement
15	Type d'interaction et sens de marche		0 = eau; 1 = glace; -1 = marche arrière; 0 = arrêt; 1 = marche avant
16	Pas d'hélice	degré	Signal positif = marche avant
17	Vitesse d'avancement	m/s	Valeur absolue
18	Angle de barre	degré	Signal positif = tribord
19	Moment de flexion	kN.m	Signal positif = bout de pale flexion avant
20	Couple de torsion de pale	kN.m	Signal positif = bord de fuite flexion avant
21	Force sur pale	kN	Signal positif = bout de pale flexion avant
22	Vitesse de rotation arbre	tr/min	toujours positif
23	Position pale: début, crête, fin	degré	0° = haut 90° bâbord 1 pale
24	Énergie et durée torsion; aire sous-tendue		Énergie int. = kJ; durée = s; aire sous-tendue = kN.s
25	Poussée-temps début, crête, fin	s	Poussée, sélection automatique
26	Poussée-valeur début, crête, fin	kN	Poussée, sélection automatique
27	Poussée-couple début, crête, fin	kN.m	Poussée, sélection automatique
28	Couple-temps début, crête fin	s	Poussée, sélection automatique
29	Couple-poussée début, crête, fin	kN	Poussée, sélection automatique
30	Couple-valeur début, crête, fin	kN.m	Poussée, sélection automatique

4.2 Classement des événements

Après l'épuration des données, on a procédé à leur analyse préliminaire. Tout d'abord, les 343 enregistrements ont été rangés dans les catégories suivantes:

- aucune interaction apparente,
- interaction isolée,
- broyage des glaces, et
- engorgement de la tuyère.

4.3 Description d'un événement

Ensuite, une analyse détaillée a été faite d'un essai dans le but de valider les constatations concernant le comportement du mécanisme de propulsion et les corrélations croisées touchant les variables d'interaction, comme le couple de torsion de l'arbre, l'angle de pas, le couple de torsion de la pale, etc.

4.4 Analyse des efforts sur pale

Il y a eu également une analyse poussée des efforts subis par la pale pour déterminer leurs composantes hydrodynamiques et celles attribuables aux glaces, précisant leur intensité, sens et point d'application sur la pale. Les principales constatations sont résumées ci-dessous:

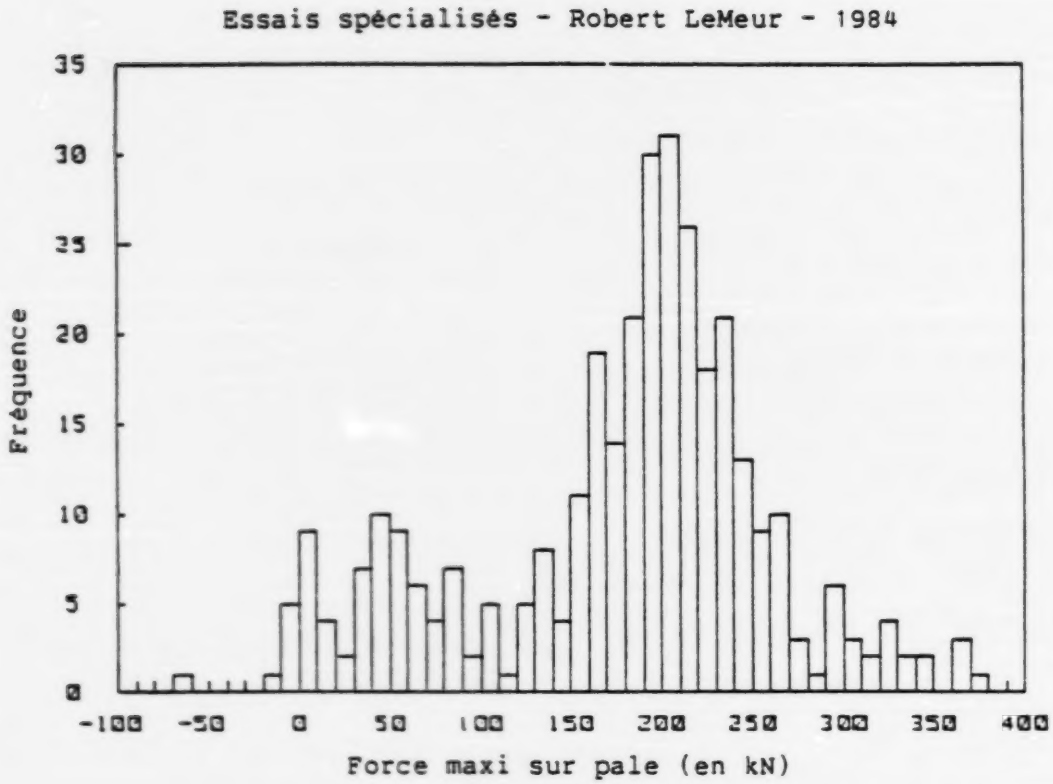
- La charge maximum enregistrée, au niveau de la pale, a été de 375 kN, soit 5,3 fois la charge hydrodynamique au point fixe en régime permanent (voir figures 4.4.1 et 4.4.2).

- Les charges hydrodynamiques consécutives au blocage partiel de la tuyère étaient presque aussi élevées (85 p. 100) que celles dues au choc des glaces (voir figure 4.4.3).

- Dans la plupart des cas, les forces d'impact étaient dirigées vers l'avant, mais il y en avait aussi vers l'arrière.

- Au cours d'un certain nombre d'événements, la force exercée par les glaces se portait parallèlement au plan de la pale.

- Les coordonnées circonférentielles calculées des forces hors plan situent celles-ci le long de l'axe de la pale. Cela peut être dû à l'impossibilité de prendre en compte la composante dans le plan de cette force.



Nombre total des données retenues: 340
Moyenne des forces retenues: 177,37
Écart type: 82,413

Toutes données utilisées

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.4.1 Histogramme des forces maxi subies par la pale instrumentée

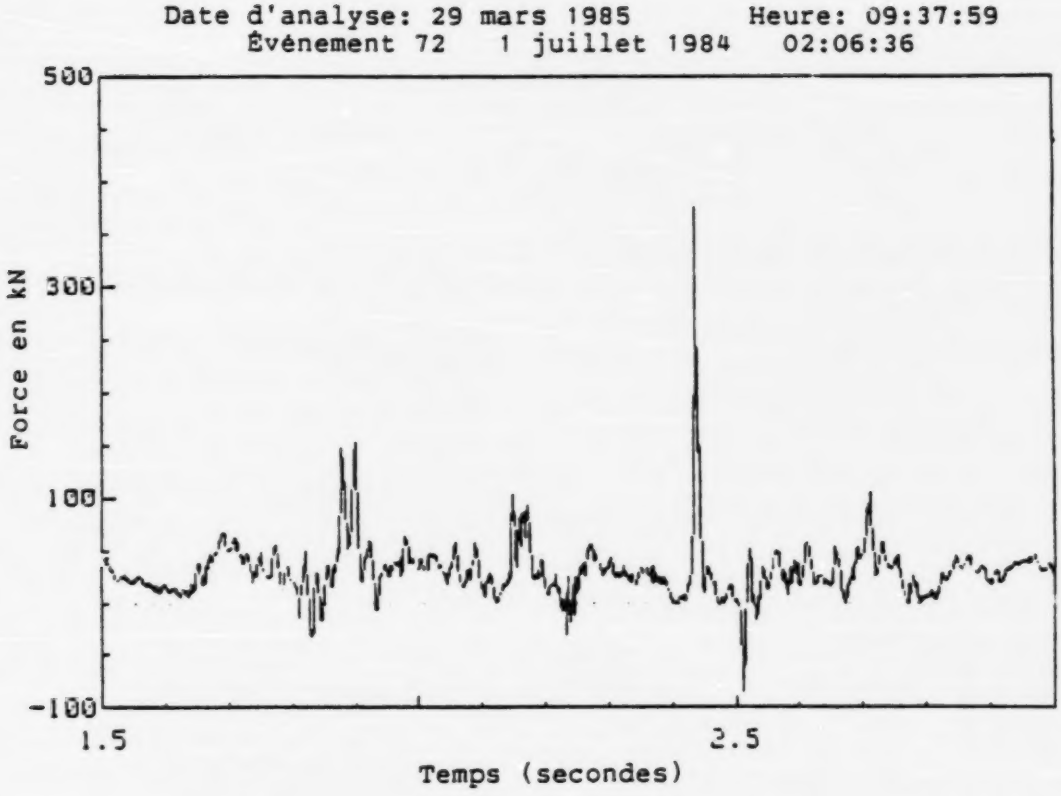
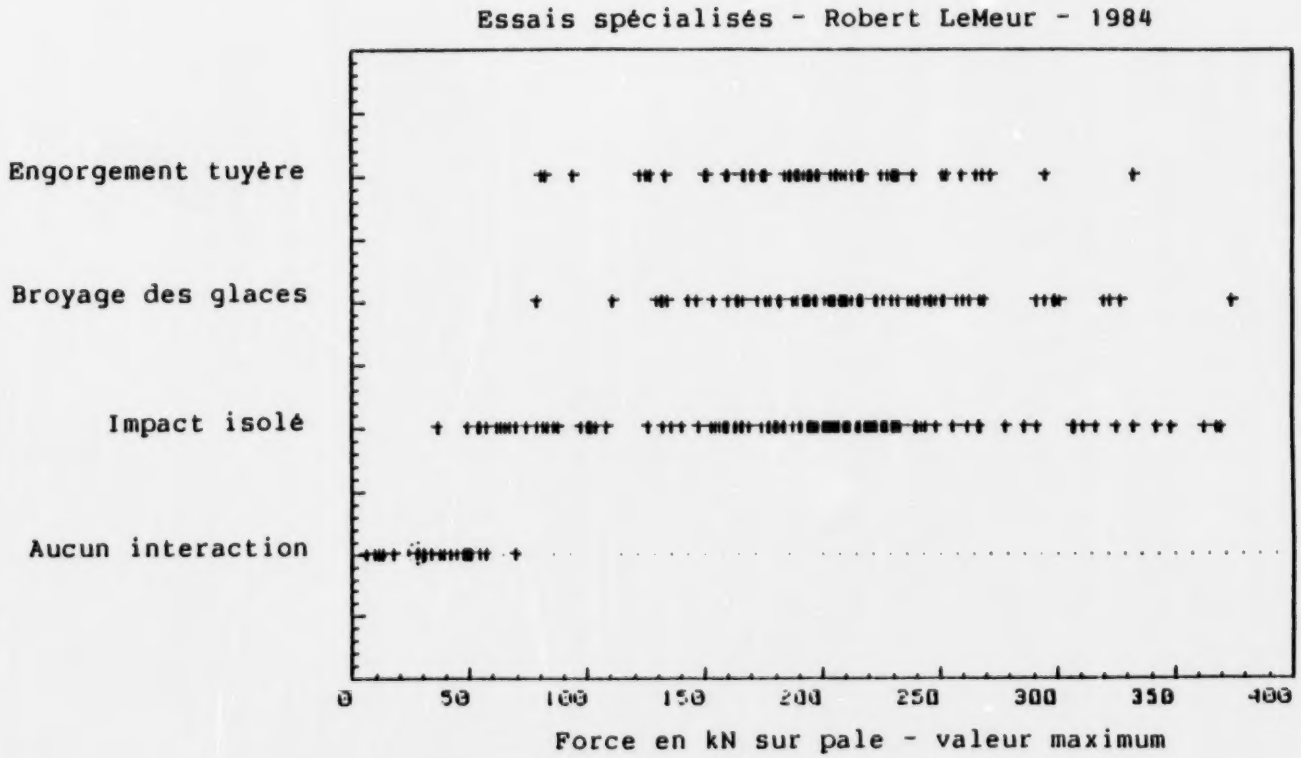


Figure 4.4.2 Évolution dans le temps de la force exercée sur la pale instrumentée - événement 72



Nombre total des données retenues: 321

Critères de sélection: sens force maxi > 0

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.4.3 Relation entre la valeur maximum des forces enregistrées et le genre d'interaction

- Les forces d'impact les plus élevées se produisent loin du moyeu d'hélice, c'est-à-dire sur la moitié extérieure de la pale (r/R = 0,84).

- L'intensité des forces transmises à la ligne d'arbres décroît à mesure qu'augmente la distance entre l'axe de l'arbre et le point d'application.

- La durée moyenne des impacts était de 0,063 de seconde.

- Plus l'impact est fort, moins il dure.

- Les impulsions de faible durée correspondent à des chocs intenses.

- Les forces d'impact les plus élevées sont le fait de petits blocs de glace.

Une étude de l'influence de divers paramètres sur l'intensité de l'effort exercé sur la pale a débouché sur les constatations suivantes:

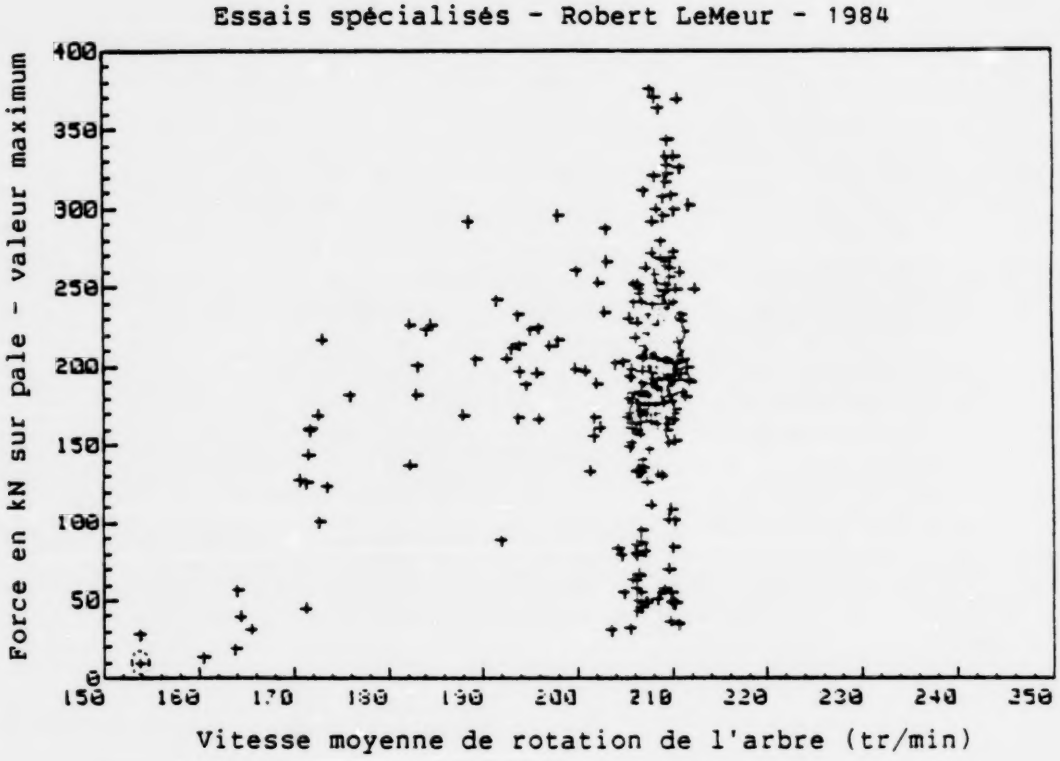
Régime de rotation: la relation entre le régime de rotation de l'arbre et la valeur maximum des efforts subis par la pale est illustrée dans la figure 4.4.4. L'augmentation de ce régime entraîne un accroissement de l'intensité des forces d'impact en vertu de la formule suivante:

$$\text{Effort maxi sur pale} = 80\ (\text{tr/min} - 160)^{1/4}$$
Lorsque le régime est > 160 tr/min

Cette équation est tirée exclusivement des données acquises au cours des essais et ne saurait être généralisée. Les valeurs peu élevées des efforts correspondant à un régime de 160 tr/min reflètent simplement le manque de données à ce régime. Les changements de pas n'ont aucun effet sur cette tendance.

Pas d'hélice: à 30 p. 100 près du pas d'hélice moyen, l'orientation des pales n'a pas d'effet manifeste sur l'effort subi par la pale. Un pas inférieur à 16° entraîne une forte baisse des forces exercées sur la pale. Un pas négatif se solde par des forces d'impact extrêmement faibles.

Angle de gouvernail: lorsque le navire vient par bâbord, la fréquence et l'intensité des impacts sont plus élevées à l'endroit de l'hélice de tribord que lorsque le gouvernail est en parallèle ou viré vers tribord.



Nombre total des données retenues: 312

Critères de sélection:

vitesse moyenne de rotation > 100 tr/min
et
valeur moyenne du pas d'hélice > 0°

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.4.4 Relation entre la vitesse de rotation de l'arbre et la valeur maximum des forces enregistrées par la pale instrumentée, angle de pas positif

Vitesse du navire: il n'y a pas de corrélation entre la vitesse du navire et la valeur de l'effort maximum sur la pale. La charge hydrodynamique s'exerçant sur la pale peut se calculer à l'aide de la formule suivante:

$$(EP)_{hydro} = 51,5 - 2,92 \times \text{la vitesse du navire.}$$

la charge étant exprimée en kN et la vitesse du navire en m/s. À remarquer que cette équation ne vaut que pour les conditions de l'essai.

4.5 Couple de torsion sur arbre

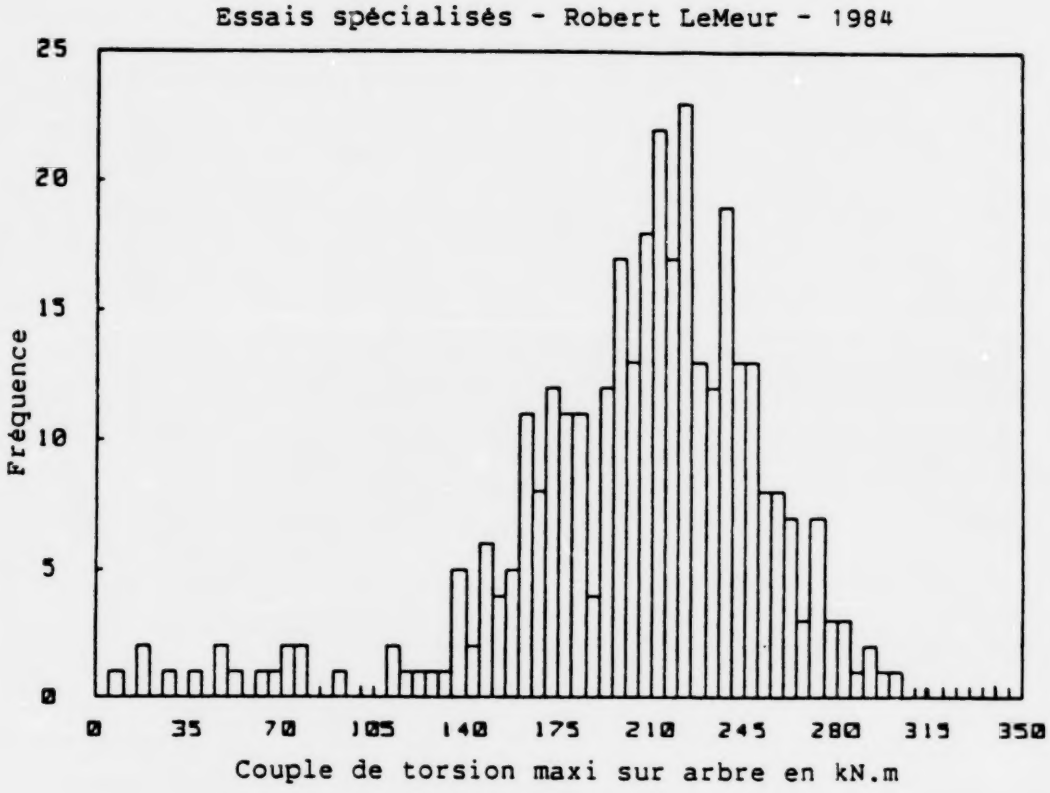
La figure 4.5.1 présente un histogramme des couples maximums enregistrés. Voici les principales conclusions:

- Le couple le plus élevé enregistré à été de 305 kNm.
- Il n'y a pas de corrélation entre couple et poussée maximums.
- Les couples maximums correspondent aux faibles poussées.
- Le couple de torsion maximum sur une pale correspondait au quintuple du couple hydrodynamique maximum au point fixe en régime permanent.
- Le couple de torsion ne varie pas en fonction des mouvements du gouvernail.

4.6 Poussée sur arbre

Les figures 4.5.2 et 4.5.3 présentent un histogramme des poussées maximums et minimums respectivement, les premières correspondant à des impacts dirigés vers l'arrière alors que les autres résultent d'impacts vers l'avant.

- La valeur moyenne de la poussée sur arbre en eau libre se calcule à l'aide de la formule suivante: Poussée = 283 - 9,5 V où la poussée est exprimée en kN et la vitesse en m/s.
- Au contact des glaces, cette poussée fluctue considérablement, tant en marche avant qu'en marche arrière.
- La variation maximale de la poussée sur arbre était de 4,6 fois la poussée au point fixe en marche avant et de 1,7 fois cette poussée en marche arrière. Ces

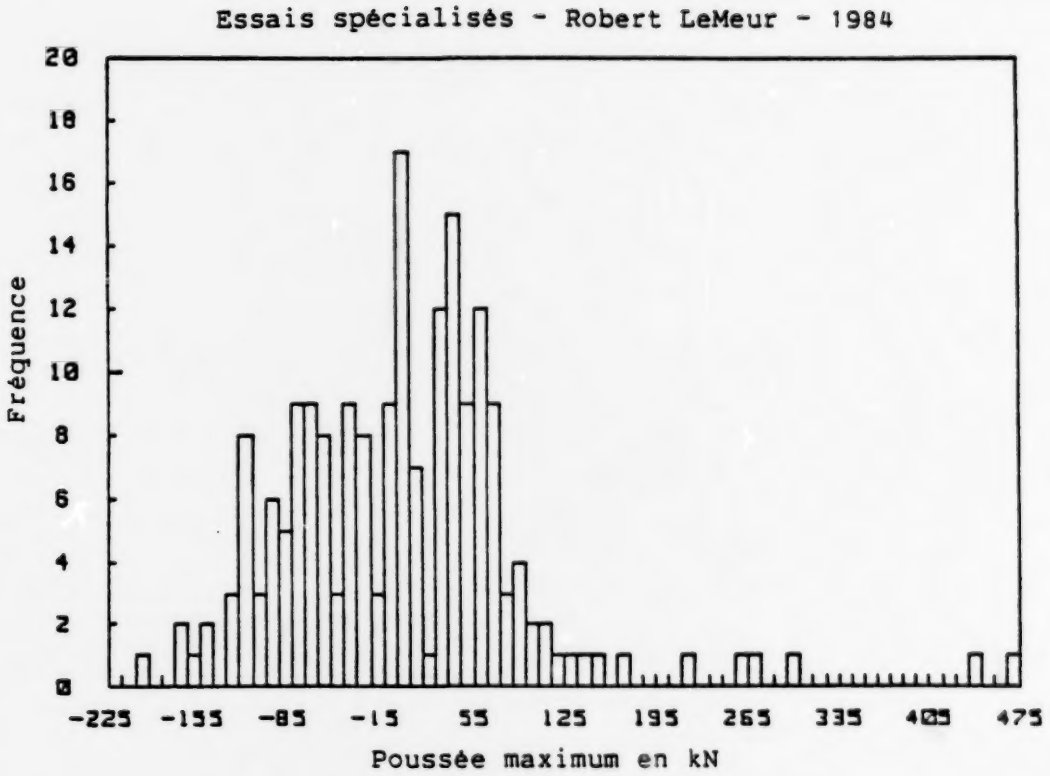


Nombre total des données retenues: 336
Valeur moyenne des données retenues: 204,20
Écart-type: 49,005

Toutes données utilisées

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.5.1 Histogramme des couples de torsion maximums subis par l'arbre instrumenté

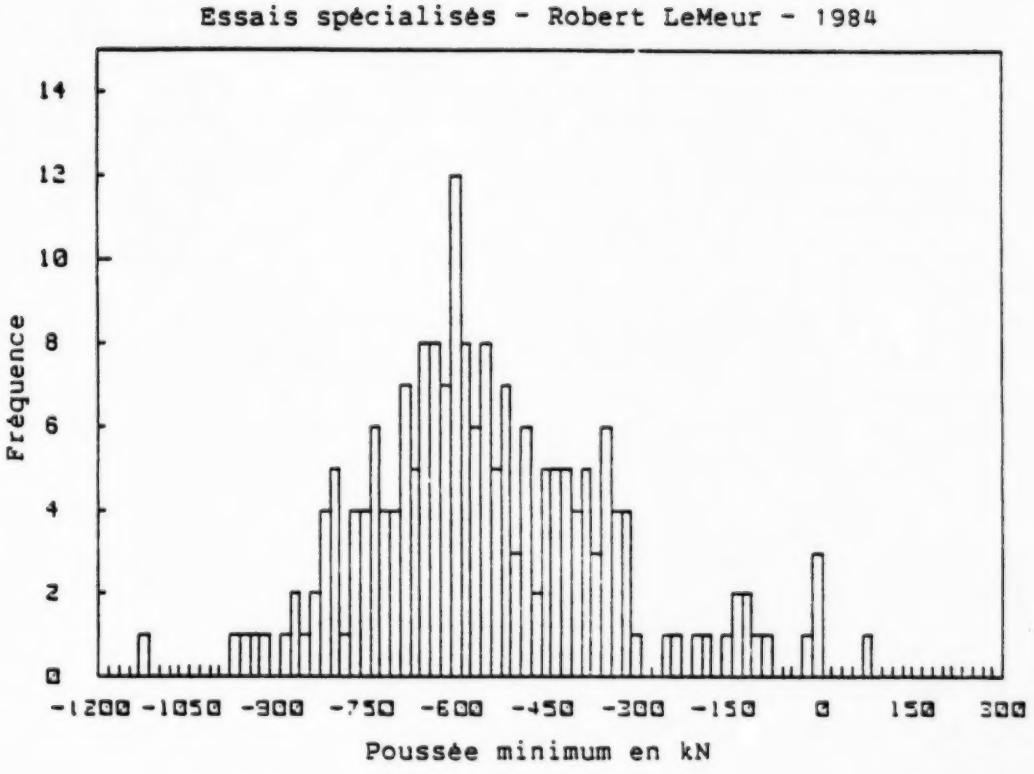


Nombre total des données retenues: 193
Valeur moyenne des données retenues: ,42901
Écart-type: 93,105

Toutes données utilisées

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.5.2 Histogramme des poussées maximums subies par l'arbre instrumenté



Nombre total des données retenues: 193
Valeur moyenne des données retenues: -556,7
Écart-type: 202,98

Toutes données utilisées

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.5.3 Histogramme des poussées minimums subies par l'arbre instrumenté

valeurs restent à vérifier étant donné la dérive constatée des signaux correspondants.

- En eau chargée de glaces, la poussée moyenne sur arbre s'est élevée à 2,2 fois la poussée hydrodynamique au point fixe (valeur à contre-vérifier).

- La poussée moyenne sur arbre va croissant lorsque le gouvernail est virée sur bâbord.

Une étude de la durée des événements a permis de constater que:

- les chocs intenses sont de courte durée,

- la durée moyenne des chocs est égale au temps nécessaire à la pale pour franchir une distance égale à sa largeur (en degrés), et

- les chocs de plus grande durée engendrent des efforts moindres.

Une analyse de la position de la pale au moment du choc initial mène aux conclusions suivantes:

- la présence d'un talon de quille à l'embouchure de la tuyère a une influence marquée sur la position des pales au moment du contact avec les glaces. talon, aucun impact ne se produit).

- L'interaction maximum glaces/hélice survient lorsque la pale se situe à quelque 50° et 240° en sens antihoraire par rapport à midi.

- Aux fins du calcul de la ligne d'arbres, prendre comme points d'interaction maximum les valeurs suivantes: 80° et 270° environ.

- Les vibrations de l'arbre devraient être plus prononcées dans le plan horizontal que dans le plan vertical.

Une analyse des mouvements de la pale sous charge a montré que les vibrations engendrées par les glaces font augmenter la moyenne des poussées. Elle a montré aussi que l'amortissement des vibrations par l'eau était élevée (25 p. 100 de l'amortissement critique) et que le coefficient de masse ajoutée était de 4. L'amplification dynamique de la réaction de la pale est un facteur de première importance dans l'appréciation des résultats des essais. En ce qui concerne les charges les plus élevées, qui sont de très

courte durée, la technique d'analyse statique ne convient pas puisqu'elle sous-évalue les forces en jeu.

Le moment de flexion maximum de la pale, enregistré au cours des essais, était de 310 kNm. Ce moment fait subir à la pale des contraintes supérieures à sa limite élastique en compression.

4.7 Modèle théorique

La comparaison des données aux formulations analytiques a permis de constater la spécificité extrême du modèle analytique et l'impossibilité d'en vérifier la validité dans la majorité des cas. Seules les grandes variations des paramètres fondamentaux, soit la vitesse de rotation, l'angle du pas, et autres, entraînent des changements sensibles du moment de flexion et des forces s'exerçant au niveau de la pale. C'est pourquoi il a fallu créer un modèle à concentration "massique" d'après les données connues. Le premier modèle analytique utilisé devait servir pour le contrôle de la validité des résultats obtenus et comme outil de référence pour des travaux ultérieurs. Le modèle ainsi créé comporte les éléments suivants:

Intensité de l'effort sur pale:

- l'effort maximum sur pale est égal à -80 + 0,16 x puissance à l'arbre (effort en kN, puissance en kW). Le sens d'application est perpendiculaire à la corde de pale pour r/R = 0,47. Le point d'application en coordonnées radiales est r/R = 0,7 et en coordonnées circonférentielles, à mi-chemin entre le bord d'attaque et le centre de la pale. (Cette affirmation nécessite cependant d'être contre-vérifiée.) La durée d'application est égale au temps nécessaire à la pale pour franchir une distance égale à sa corde au point d'application de la charge, à la vitesse de rotation retenue.

Moment de flexion de la pale:

- Le moment de flexion maximum de la pale pour r/R = 0,37 est $(MFP)_{MAX} = \frac{\text{puissance à l'arbre en kW}}{11}$

Il s'agit du moment de flexion total, combinant les charges hydrodynamiques et celles des glaces.

Couple de torsion de l'arbre:

- Le couple en torsion maximum de l'arbre équivaut au double du couple au point fixe et dure 0,55 seconde.*

Poussée sur l'arbre:

- la poussée maximum sur l'arbre équivaut à 4,6 fois la poussée au point fixe et dure 0,05 seconde. Cette valeur est fournie sous réserve et demande à être vérifiée. La faible durée de cette poussée est due à la grande rigidité longitudinale de l'arbre, qui explique la fréquence élevée de la réponse vibratoire.

Modèle théorique de pale:

- les contraintes calculées par modélisation assimilant la pale à une poutre simple et celles mesurées au cours des essais d'étalonnage concordaient bien. Le rapport des contraintes de compression et de traction pour r/R = 0,6 est de 1,48. Cela signifie que l'axe neutre de la pale est plus proche du côté pression et que les contraintes les plus élevées naissent du côté succion.

4.8 Modélisation des efforts de torsion et de poussée

Les résultats présentés plus haut ont été tirés des données "brutes" acquises à l'aide de l'instrumentation de l'hélice et de la ligne d'arbres. Pour déterminer s'il serait possible de prévoir l'intensité des forces exercées par les glaces à partir des seules réactions de l'arbre, les chercheurs ont conçu un modèle à concentration "massique" à trois degrés de liberté, afin d'étudier la réponse axiale et en torsion de la ligne d'arbres sous l'effet des efforts de torsion et de poussée, respectivement. Utilisant les signaux transmis par les capteurs de couple et de poussée comme fonctions d'étalonnage, les valeurs de couple et de poussée à prendre en compte ont été dérivées par approximations successives. Par la suite, elles furent comparées aux relevés de l'instrumentation de pale pour assurer leur compatibilité. Les principales conclusions tirées de cette modélisation sont énoncées ci-après:

- Les modèles de comportement axial et en torsion conviennent à la prédiction des forces exercées par les glaces sur les pales d'hélice.

- Ces modèles peuvent servir à déterminer le nombre de pales subissant la charge des glaces et le sens d'application de cette charge.

* À noter que les durées indiquées sont celles des réponses enregistrées qui peuvent être différentes des durées d'application de la charge correspondante.

La figure 4.8.1 montre l'allure du couple de torsion théorique de pale qui provoque, au droit des jauges du contrainte torsionnelle de l'arbre correspondant, une réponse similaire à celle découlant d'un impact réel.

Quant à la figure 4.8.2, elle en fait autant en ce qui concerne les efforts de poussée transmis par la pale.

4.9 Modèle théorique de la goupille d'accouplement

Il a fallu réévaluer le modèle où figure la goupille d'accouplement après le nouvel étalonnage des capteurs équipant le coulisseau d'orientation des pales. La figure 4.9.1 présente un histogramme des charges maximums subies par ce coulisseau au contact des glaces. L'analyse des données fournies par ces capteurs et par ceux mesurant le couple de torsion de la pale et la pression de l'huile d'asservissement a montré les faits suivants:

- à cause du frottement dans le mécanisme variateur de pas, les fluctuations maximums du couple de torsion de la pale et des charges subies par le coulisseau d'orientation des pales ne peuvent être mesurées de façon précise par le biais de la pression d'huile d'asservissement, et

- le frottement à l'endroit du système porte-pale limite la charge subie par le coulisseau d'orientation des pales à 90 p. de la charge calculée en l'absence de tout frottement.

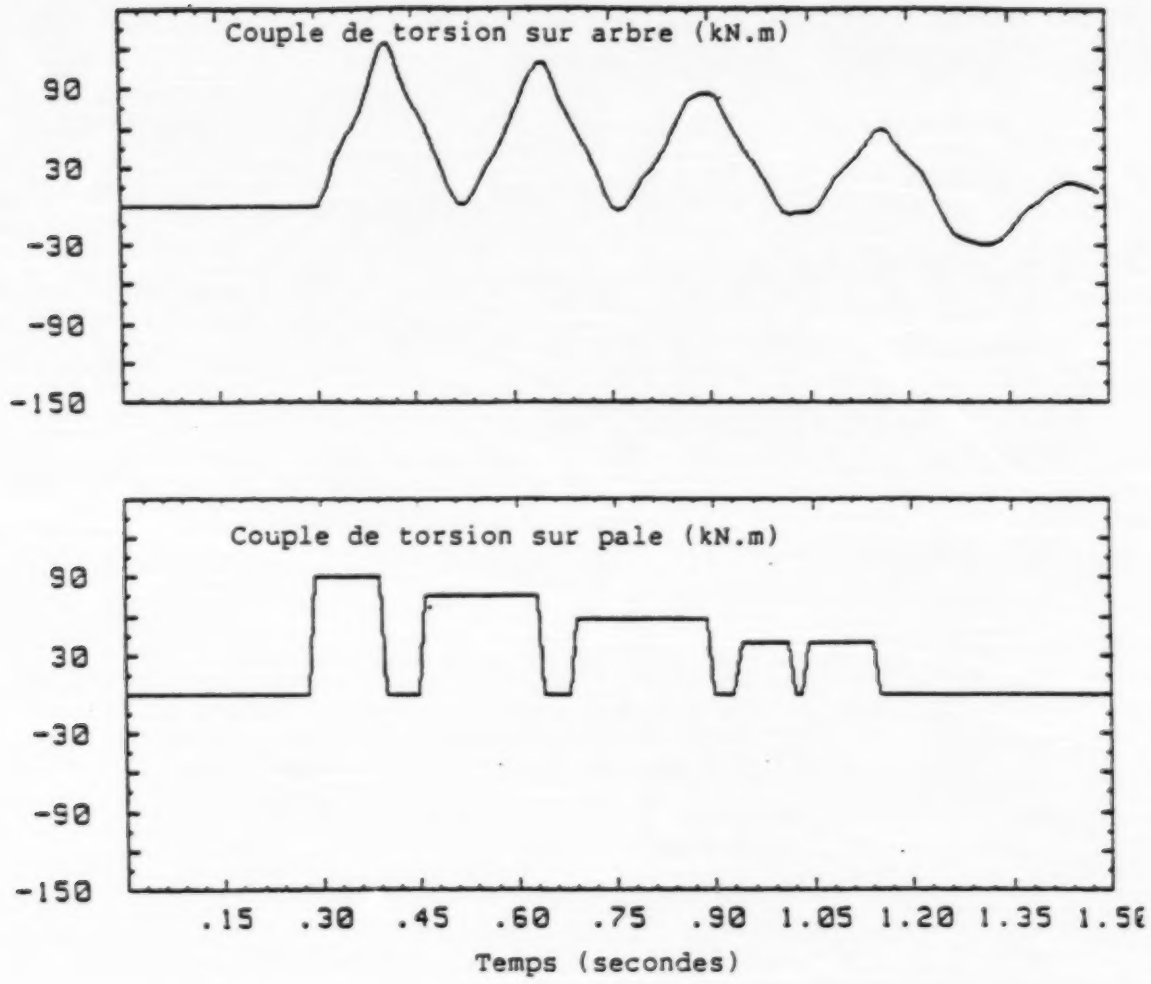
4.10 Sondes de proximité

Une analyse des données dérivées des sondes de proximité de l'arbre a été faite, bien que la défaillance des sondes ait eu pour effet de réduire la quantité des données enregistrées, lesquelles sont présentées dans la figure 4.10.1. Les principales conclusions sont les suivantes:

- il y a une tendance plus marquée aux mouvements horizontaux qu'aux mouvements verticaux de l'arbre dans le palier de tube d'étambot;

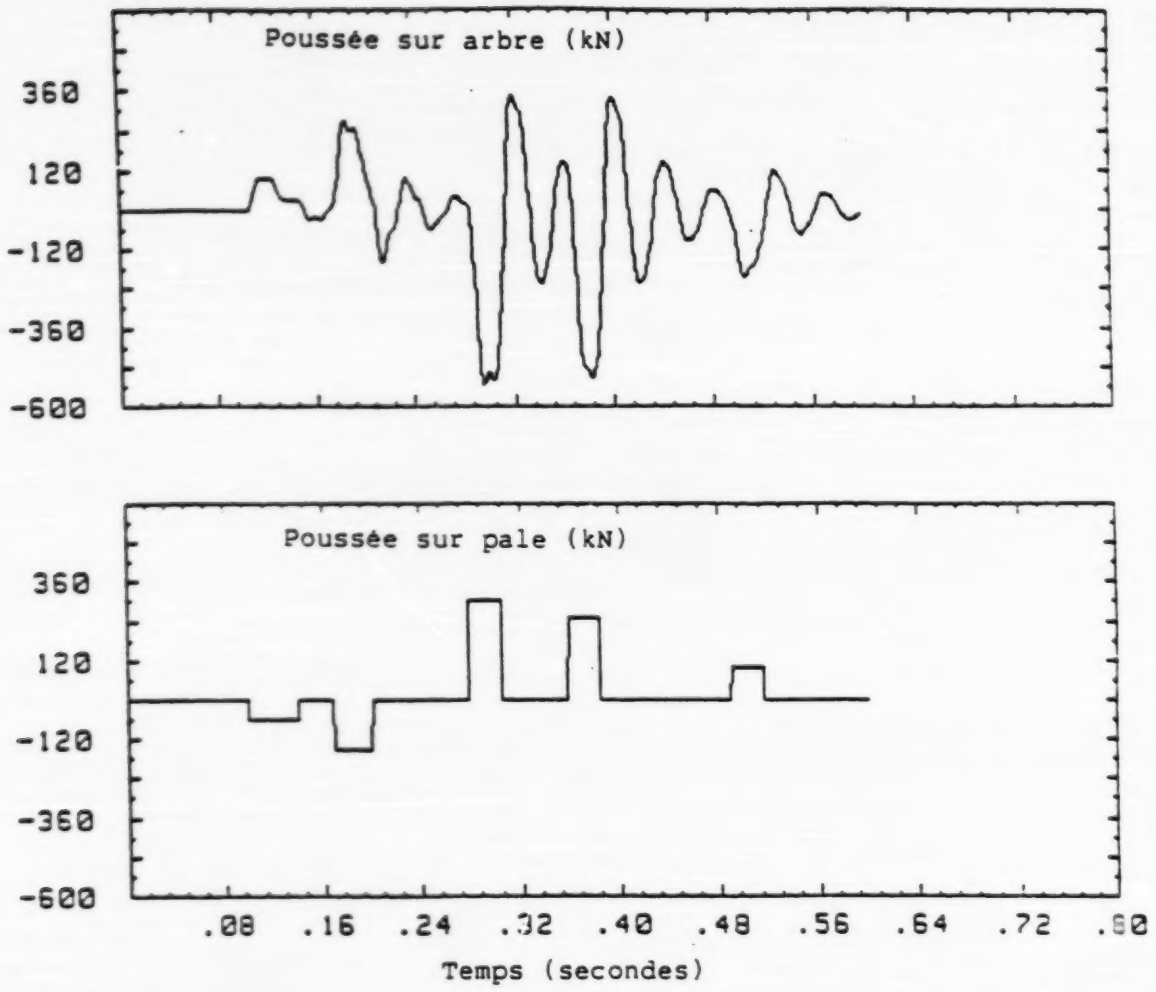
- les vibrations sont aléatoires et forcées à la fréquence de révolution de la pale;

- le comportement du palier n'a rien de commun avec celui dicté par la théorie générale des paliers hydrodynamiques en régime permanent.



Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.8.1 Variation estimative du couple de torsion sur pale - événement 117

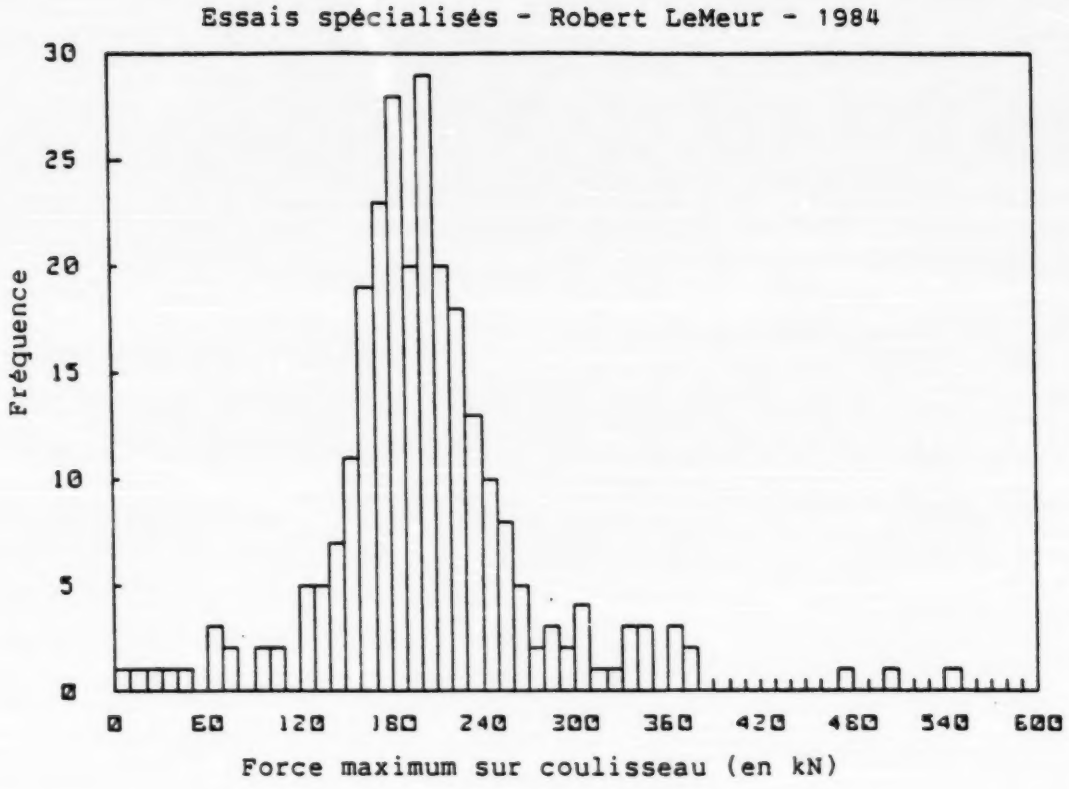


Courbes de poussée déterminées par modélisation du système propulsif du N.M. Robert LeMeur

Événement 72
Date d'analyse: 85/03/14

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.8.2 Variation calculée des poussées correspondant à une série d'impacts de faible durée - événement 72

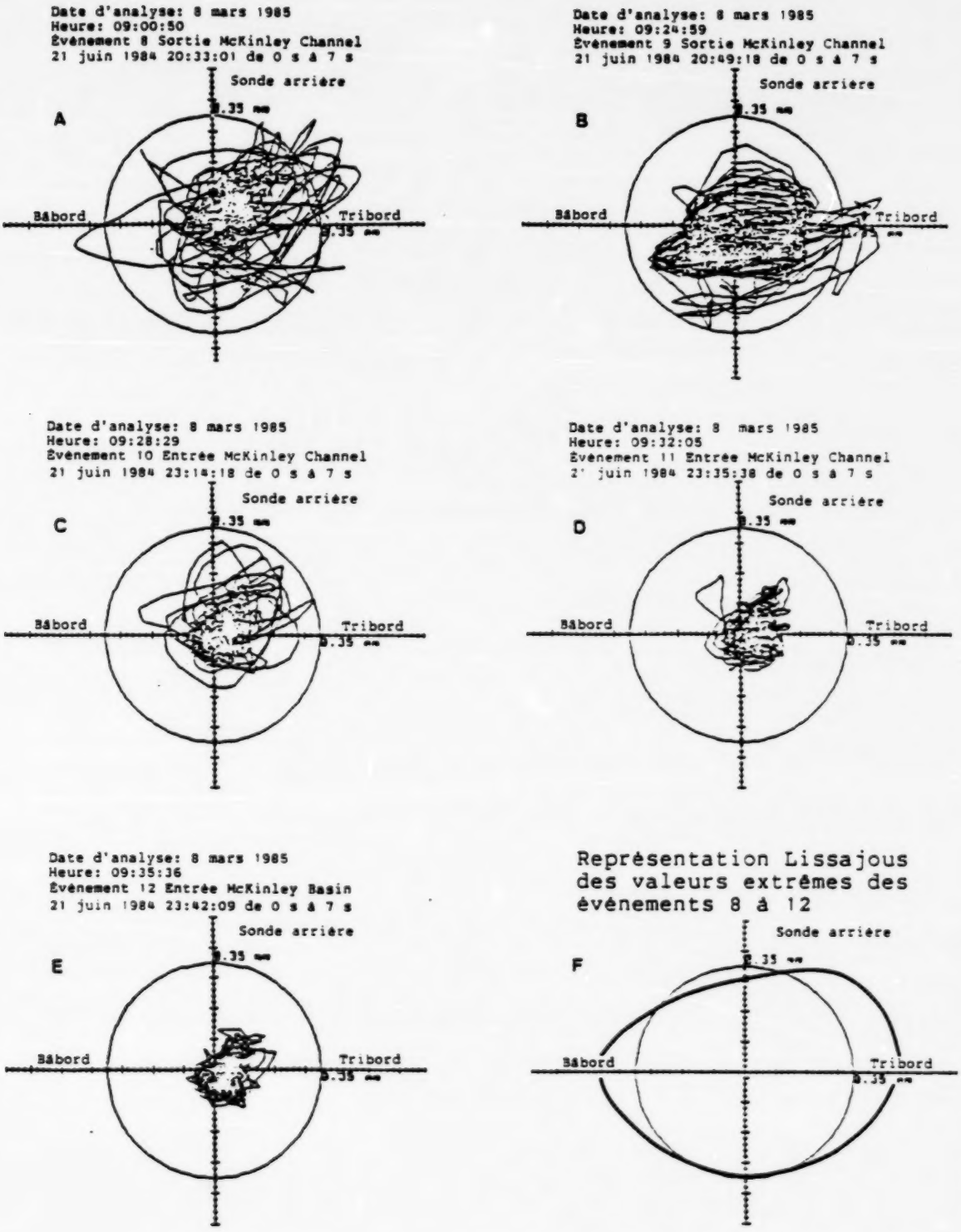


Nombre total des données retenues: 262
Valeur moyenne des données retenues: 204,29
Écart-type: 67,067

Toutes données utilisées

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.9.1 Histogramme des forces maximums sur le coulisseau d'orientation des pales



Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 4.10.1 Figures de Lissajous relatives aux événements 8 à 12

5. ANALYSE STATISTIQUE À LONG TERME

Dès le début du projet, il a été évident que les données recueillies au cours d'une saison complète d'exploitation ajouteraient considérablement aux connaissances acquises lors des essais spécialisés de 5 jours. Les enregistrements ont intéressé:

- la répartition statistique des signaux de couple et de poussée, et
- un échantillonnage de valeurs de couple et de poussée rapportées à la vitesse du navire.

Les figures 5.1 et 5.2 présentent les résultats du comptage des efforts de poussée et de torsion subis par la ligne d'arbre instrumentée au cours d'une saison complète.

La comparaison des statistiques à long et à court terme concernant cette ligne d'arbres, a permis de dégager les rapports suivants:

- l'effort de compression maximum de l'arbre est de 21 p. 100 supérieur à celui constaté lors des essais spécialisés;
- l'effort de traction maximum de l'arbre était de 127 p. 100 plus grand; et
- le couple maximum à l'arbre était 10 p. 100 plus élevé.

Une importante conclusion tirée de cette comparaison est que les 343 événements sont très représentatifs de la saison d'exploitation entière, sauf pour ce qui est de la marche arrière par inversion du pas (effort de traction sur l'arbre). Les événements en question correspondent à peu de chose près aux charges maximums attribuables aux glaces sur l'ensemble de la saison d'exploitation 1984 du navire LeMeur.

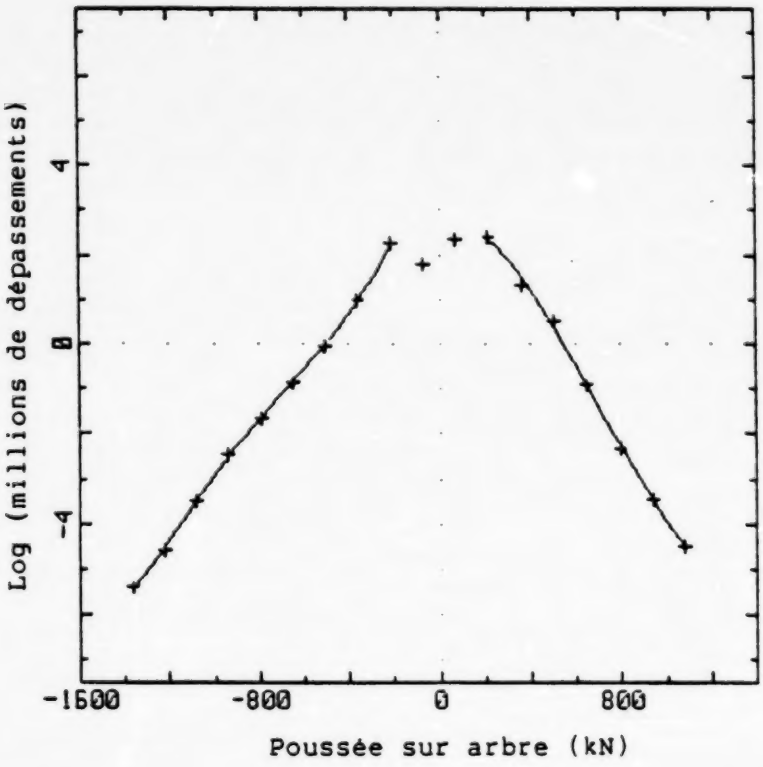
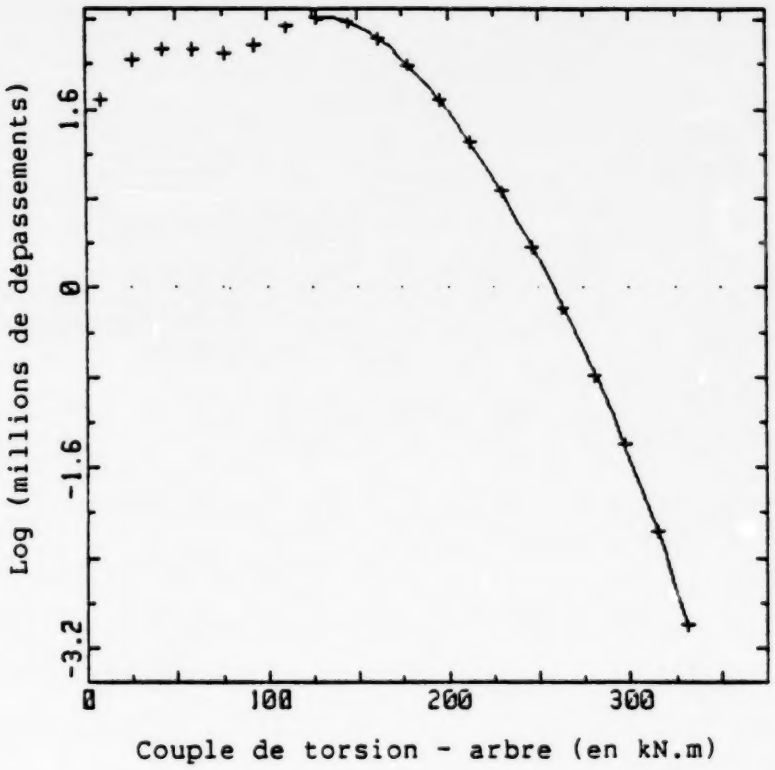


Figure 5.1 Nombre des dépassements des valeurs de poussée sur arbre enregistrés au cours de la saison 1984



Équation correspondant à la courbe ci-dessous

$$\text{Log } (Y/1E3) = -2{,}212665E\text{-}09 + X^4 + 2{,}099041E\text{-}06 + X^3 - 8{,}340003E\text{-}04 + X^2 + 1{,}309154E\text{-}01 + X - 4{,}487115$$

Mesure des paramètres d'interaction glaces/hélice

Figure 5.2 Nombre des dépassements des valeurs de torsion sur arbre enregistrés au cours de la saison 1984

6. RECOMMANDATIONS

6.1 Généralités

L'analyse préliminaire laisse entendre que le phénomène d'interaction entre les glaces et une hélice sous tuyère aurait été très mal compris jusqu'ici (les spécialistes s'étant basés sur les données concernant une hélice non protégée). La remise en question est à ce point sérieuse qu'une analyse exhaustive s'impose pour comprendre pleinement le phénomène et confirmer la validité des constatations préliminaires. Il conviendrait de ne pas interrompre les travaux actuels d'analyse puisque les principaux architectes de l'étude en cours sont disponibles à l'heure actuelle.

6.2 Pale

Une étude plus poussée de l'interaction glaces/pale s'avère indispensable pour l'évaluation de ses effets dynamiques.

La recherche concernant l'effet de l'eau sur la charge maximum imposée à la pale doit être menée à terme si l'on veut pouvoir extrapoler les données de la présente étude à d'autres navires.

L'analyse des phénomènes de fatigue sur toute la durée utile de l'hélice et de son mécanisme sous moyeu, doit être faite afin de pouvoir prévoir l'éventualité des ruptures ou défaillances par fatigue.

6.3 Paliers

Une analyse plus poussée doit être faite des résultats des essais pour:

- déterminer les facteurs d'échelle et les décalages du zéro à prendre en compte pour l'extrapolation des valeurs à d'autres navires;
- connaître et quantifier les facteurs de mésalignement de l'arbre; et
- déterminer les forces d'accélération engendrées par le mouvement radial de l'arbre.

Il faudrait élaborer un modèle mathématique capable dans la mesure du possible, de confirmer les résultats des essais en service.

6.4 Ligne d'arbres

Il est recommandé d'étudier des modèles plus élaborés qui tiennent compte de l'interaction glaces/hélice et des paramètres machine, qui ne donnent pas lieu aux mêmes approximations que les modèles actuels, mais qui aient un caractère assez général pour pouvoir s'appliquer à l'étude d'autres navires.

Il faudrait aussi analyser statistiquement les valeurs de couple de torsion et de poussée déterminées à l'aide des modèles précités.

Par ailleurs, il serait utile aux concepteurs de pouvoir disposer d'une série de formes d'ondes représentant les variations du couple de torsion et de la poussée sous l'effet de l'interaction des glaces.

Enfin, il faudrait mener une étude sur la possibilité de fonder la réglementation et la maintenance préventive des systèmes propulsifs appelés à fonctionner dans les glaces; il pourrait s'agir de modèles mathématiques de prévision des efforts sur hélice partant des valeurs de couple et de poussée enregistrées sur la ligne d'arbres.

Library and Information Centre / Centre de documentation (GSLA)
RECEIVED / REÇU LE
JUL 1987
Transport Canada / Transports Canada